

Peripheral grinding method for rotary workpiece e.g. crank-shaft crank pins**Publication number:** DE19626189**Publication date:** 1998-01-02**Inventor:** BRILL JUERGEN (DE)**Applicant:** SCHAUDT MASCHINENBAU GMBH (DE)**Classification:**

- International: *B24B5/42; B24B19/08; B24B19/12; B24B49/04; G05D5/03; B24B5/00; B24B19/00; B24B49/02; G05D5/00; (IPC1-7): B24B19/08; B24B5/42; B24B19/12; B24B49/04; G05D5/00; G05D5/03*

- European: *B24B5/42; B24B19/08; B24B19/12; B24B49/04; G05D5/03*

Application number: DE19961026189 19960629**Priority number(s):** DE19961026189 19960629**Report a data error here****Abstract of DE19626189**

The peripheral grinding method has a rotary grinding disc (3) brought into contact with the rotary workpiece by transverse displacement along an axis (x) at a given angle to its rotation axis, with indexing along the displacement axis for each rotation of the workpiece. The indexing displacement of the grinding disc is controlled in dependence in the actual material thickness (A_i) removed from the periphery of the workpiece during the previous rotation, provided by a workpiece diameter measuring device (16,17,18).

Data supplied from the **esp@cenet** database - Worldwide



DEUTSCHES
PATENTAMT

21 Aktenzeichen: 196 26 189.9
22 Anmeldetag: 29. 6. 96
43 Offenlegungstag: 2. 1. 98

51 Int. Cl.⁶:
B 24 B 19/08
B 24 B 19/12
B 24 B 5/42
B 24 B 49/04
G 05 D 5/00
G 05 D 5/03

DE 196 26 189 A 1

71 Anmelder:
Schaudt Maschinenbau GmbH, 70329 Stuttgart, DE

72 Erfinder:
Brill, Jürgen, 70619 Stuttgart, DE

56 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit
in Betracht zu ziehende Druckschriften:

DE 42 24 943 C2
DE 23 33 288 C3
DE 40 23 587 A1
DE 35 29 099 A1
DE 29 49 427 A1
CH 6 37 053 A5
EP 03 85 459 A2
EP 0 85 225 A2

FUCHS, A.: Intelligente Regelung des Außenrund-
Einstechschleifens. In: wt - Produktion und
Management 84, 1994, S.464-469;

54 Verfahren zum Schleifen rotierender Werkstücke

57 Es wird ein Verfahren zum Umfangschleifen rotierender Werkstücke beschrieben, bei dem das Werkstück um eine erste Achse gedreht wird, eine rotierende Schleifscheibe in materialabtragendem Kontakt mit dem Werkstück entlang einer in einem vorgegebenen Winkel quer zur ersten Achse verlaufenden zweiten Achse mit einem Zustellschritt pro Werkstückumdrehung zur ersten Achse hin zugestellt wird und ein am Werkstückumfang vorhandenes Materialaufmaß bis zu einem vorgegebenen Fertigmaß abgetragen wird. Die Aufgabe besteht darin, das vorgesehene Fertigmaß des Werkstückes mit wenigen Umdrehungen möglichst genau zu erzeugen. Das Verfahren sieht dazu vor, daß die Zustellung mit einer vorgegebenen Anzahl diskreter Zustellschritte ausgeführt und in Abhängigkeit vom Materialaufmaß gesteuert wird.

DE 196 26 189 A 1

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Umfangsschleifen rotierender Werkstücke, bei dem das Werkstück um eine erste Achse (C-Achse) gedreht wird, eine rotierende Schleifscheibe in materialabtragendem Kontakt mit dem Werkstück entlang einer in einem vorgegebenen Winkel quer zur ersten Achse verlaufenden zweiten Achse (x-Achse) mit einem Zustellschritt pro Werkstückumdrehung zur ersten Achse hin zugestellt wird und ein am Werkstückumfang vorhandenes Materialaufmaß bis zu einem vorgegebenen Fertigmaß abgetragen wird.

Werkstücke, die mit dem angegebenen Verfahren geschliffen werden, sind ein- oder zweiseitig eingespannte oder spitzen los um ihre Längsachse rotierende zylindrische Werkstücke, rotierende unrunde Werkstücke wie Nocken, Exzenter, Polygone oder dergl. oder exzentrisch umlaufende zylindrische Werkstücke wie die Kurbelzapfen von Kurbelwellen.

Das Schleifen rotierender Werkstücke dieser Art erfolgt heute üblicherweise auf numerisch gesteuerten Schleifmaschinen mit einer CNC-Maschinensteuerung. Die zu bearbeitenden Werkstücke werden um ihre Längsachse, die sogenannte C-Achse der Maschine gedreht, während eine auf einem Zustell- oder Schleifschlitten gelagerte, rotierende Schleifscheibe entlang einer quer zur Werkstückachse verlaufenden Linearachse, die auch als x-Achse der Maschine bezeichnet wird, in Berührung mit dem Werkstück gebracht und dann zum Abnehmen eines am Werkstück vorhandenen Materialaufmaßes auf die Werkstückachse zu vorgeschoben oder zugestellt wird, bis das Werkstück sein Fertigmaß, den gewünschten Soll-Durchmesser hat. Die CNC-Maschinensteuerung steuert und koordiniert die Drehbewegung des Werkstücks um die C-Achse und die Zustellbewegung der Schleifscheibe in der x-Achse. Sind unrunde oder exzentrisch umlaufende Werkstücke zu schleifen, so überlagert die Maschinensteuerung der linearen Zustellbewegung des Schleifschlittens eine der Form bzw. der exzentrischen Umlaufbahn des Werkstücks entsprechende Linearbewegung der x-Achse.

Es ist bekannt, die Schleifscheibe kontinuierlich zuzustellen, wodurch die Abnahme des Materialaufmaßes vom Werkstück entlang einer spiralig um die Werkstückachse verlaufenden Bahn mit abnehmendem Radius erfolgt. Mit geringer werdendem Materialaufmaß wird dabei die Zustellgeschwindigkeit in der Regel reduziert. Ist das Fertigmaß erreicht, das Materialaufmaß also restlos abgetragen, endet die Zustellung der Schleifscheibe.

Es ist auch bekannt, die Schleifscheibe diskontinuierlich schrittweise zuzustellen. Dabei wird die Zustellung bei jeder Werkstückumdrehung gewöhnlich in einer bestimmten Winkelposition des Werkstücks begonnen und innerhalb eines relativ kleinen Drehwinkels beendet. Der Rest der jeweiligen Werkstückumdrehung verläuft dann zustellungsfrei. Für das Schleifen der Nocken einer Nockenwelle ist diese Art der schrittweisen Zustellung pro Werkstückumdrehung beispielsweise in der EP 0 264 646 B1 beschrieben. Dort erfolgt die Zustellung bei jeder Werkstückumdrehung einmal an der Nockenspitze und ist innerhalb eines Winkels von 60° der Werkstückumdrehung beendet. Der Rest jeder Werkstückumdrehung erfolgt ohne weitere Zustellung. Auch die DE 35 29 099 C2 beschreibt die schrittweise Zustellung beim Schleifen von Nocken, wobei hier der Zustellschritt jeweils im Bereich des Grundkreises eines Nockens in einem Winkelbereich von 20° bis 180° der Nockenumdrehung stattfindet. Über die Größe der Zustellbeträge enthalten diese Schriften keine Aussagen.

Es ist jedoch üblich, die Schleifscheibe während einer Schrapp-Phase schneller oder in größeren Schritten und während einer Schlicht-Phase langsamer oder in kleineren Schritten zuzustellen. Dies zeigt z. B. die DE 40 23 587 C2, die sich ebenfalls auf das Schleifen von Nocken bezieht. Während der Schrapp-Phase wird eine Folge relativ großer Zustellschritte fest vorgegebener, von Schritt zu Schritt abnehmender Schrittweite ausgeführt, bis ein Schwellwert des Materialaufmaßes erreicht wird. Hier schließt sich eine Schlicht-Phase mit kleineren Zustellschritten ebenfalls abnehmender Schrittweite an. Die Zustellung wird in beiden Phasen in zusätzlichen Werkstückumdrehungen mit den jeweils festgesetzten Schrittweiten fortgesetzt, bis der Schwellwert bzw. das Fertigmaß des Werkstücks erreicht ist. So ist eine relativ lange Bearbeitungsdauer nicht auszu-schließen. Ein ähnliches Vorgehen ist für das Schleifen von Nocken auch in der EP 0 085 225 B1 beschrieben. Hier sind je zwei Zustellschritte fest vorgegebener Schrittweite für das Grobschleifen und das Feinschleifen des Werkstücks vorgesehen, so daß das Werkstück insgesamt mit vier Zustellschritten fertig geschliffen wird. Dabei gibt es allerdings keine Gewähr für die genaue Erzeugung eines vorgegebenen Fertigmaßes des Werkstücks, weil keinerlei Maßnahmen für eine Fehlerkompensation vorgesehen sind. So müssen beispielsweise auf Temperatureinflüssen oder auf einer Werkstückausbiegung beruhende Abmessungsfehler des fertigen Werkstückes entweder hingenommen oder durch zusätzliche Werkstückumdrehungen ohne Zustellung unter Produktivitätsverlust ausgeglichen werden. Die bekannten Schleifverfahren können also letztlich noch nicht voll befriedigen, was die exakte Übereinstimmung der erreichten Werkstückmaße mit den jeweiligen Vorgaben und die Bearbeitungsdauer und damit ihre Produktivität insbesondere bei kleinen Werkstückdrehzahlen angeht.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Schleifverfahren der eingangs angegebenen Art insbesondere hinsichtlich der Genauigkeit der Werkstückbearbeitung und seiner Produktivität weiter zu verbessern.

Gelöst wird diese Aufgabe bei einem Verfahren der eingangs angegebenen Art erfindungsgemäß dadurch, daß die Zustellung wenigstens einiger Zustellschritte in Abhängigkeit vom Materialaufmaß gesteuert wird. Dadurch, daß das vor einem Zustellschritt am Werkstück noch vorhandene Materialaufmaß die Weite des folgenden Zustellschritts bestimmt, kann die Zustellung unter Berücksichtigung der gegebenen Bedingungen in optimalen Schritten erfolgen, was sowohl der Genauigkeit der Werkstückbearbeitung als auch ihrer Produktivität zugute kommt. Die Erfindung sieht in weiterer Ausgestaltung des Verfahrens vor, daß im Verlauf wenigstens einer Werkstückumdrehung wenigstens einmal das aktuelle Werkstückaufmaß erfaßt wird und daß die Zustellung der Schleifscheibe beim folgenden Zustellschritt in Abhängigkeit von dem aktuellen Werkstückaufmaß gesteuert wird. So wird die Zustellung in jedem Zustellschritt von dem im zuvor ausgeführten Zustellschritt erreichten aktuellen Werkstückaufmaß abhängig gemacht. In Fortsetzung der Erfindung werden die Zustellschritte jeweils in einem vorgegebenen Winkelabschnitt am Beginn einer Werkstückumdrehung ausgeführt, und das Materialaufmaß wird jeweils gegen Ende der Werkstückumdrehung, vorzugsweise innerhalb des letzten

Viertels der Umdrehung, gemessen. Auf diese Weise kann der Ermittlung des nächsten Zustellschritts das während der vorangegangenen Umdrehung tatsächlich erreichte Restaufmaß zugrunde gelegt werden, weil der während dieser Umdrehung erzeugte Werkstückdurchmesser im letzten Viertel der Umdrehung korrekt abgegriffen werden kann.

Vorzugsweise wird gemäß einer Weiterbildung der Erfindung die Zustellung durch die Beeinflussung des Zustellbetrages der Zustellschritte gesteuert.

Eine bevorzugte Weiterbildung der Erfindung sieht vor, daß jedem Wert des Materialaufmaßes in einer Zuordnungstabelle ein Zustellbetrag zugeordnet wird, daß die Zuordnungstabelle in einer Maschinensteuerung gespeichert wird und daß die Zustellung der Schleifscheibe jeweils mit dem Zustellungsbetrag ausgeführt wird, der in der Zuordnungstabelle dem Wert des zuvor erfaßten aktuellen Materialaufmaßes zugeordnet ist. Gemäß einer Variante des erfindungsgemäß vorgeschlagenen Verfahrens kann vorgesehen sein, daß in der Maschinensteuerung ein die Werte des Materialaufmaßes mit bestimmten Zustellbeträgen verknüpfender Algorithmus hinterlegt wird und daß die Zustellung jeweils mit dem Zustellungsbetrag ausgeführt wird, der aufgrund des Algorithmus aus dem jeweils aktuellen Materialaufmaß ermittelt wird. Auf diese Weise wird jedem Zustellschritt in Abhängigkeit von dem noch vorhandenen Materialaufmaß ein im Hinblick auf die technologischen Bedingungen optimaler Zustellbetrag zugewiesen. Um zu verhindern, daß beim Schleifen das gewünschte Fertigmaß des Werkstückes unterschritten wird, sieht das Verfahren weiter vor, daß ein unterer Grenzwert des Materialaufmaßes festgelegt wird und daß der Zustellung der Schleifscheibe im nächsten Zustellschritt ein fester Bruchteil des aktuellen Materialaufmaßes vorgegeben wird, sobald dieses den Grenzwert unterschreitet. Durch diese Maßnahme kann sich der Materialabtrag vom Werkstück dem Fertigmaß nur nähern, ohne es zu unterschreiten.

Eine weitere bevorzugte Variante des Verfahrens nach der Erfindung besteht darin, daß einer Reihe von Werkstückumdrehungen je ein Sollwert der Spanungsdicke zugewiesen wird und daß im Verlauf einer jeden Werkstückumdrehung wenigstens angenähert Material der ihr zugewiesenen Spanungsdicke vom Werkstück abgetragen wird. Um das mit der gewünschten Genauigkeit zu ermöglichen, wird die Schleifscheibe in Fortsetzung der Erfindung bei jeder Werkstückumdrehung um einen von der Spanungsdicke und von einer Korrekturgröße abhängigen Zustellbetrag zum Werkstück hin zugestellt. Da das Werkstück unter der Wirkung der Schleifscheibe quer zu seiner Längsachse in x-Richtung ausgebogen wird, wird das Ausmaß der Ausbiegung erfaßt und in der Korrekturgröße zur Korrektur des Zustellbetrages im Sinne der Kompensation des Einflusses der Durchbiegung verwertet. Zur Bestimmung der Durchbiegung des Werkstückes werden in weiterer Ausbildung der Erfindung im Verlauf einer aktuellen Werkstückumdrehung das Materialaufmaß und die Position des Zustellschlittens auf der x-Achse erfaßt, und aus dem aktuellen Materialaufmaß und der Schlittenposition wird die aktuelle Ausbiegung des Werkstückes bestimmt. Da das aktuelle Materialaufmaß gemäß der Erfindung immer am Ende einer Werkstückumdrehung erfaßt wird, wenn die Zustellung der Schleifscheibe bereits stattgefunden hat, kann der gemessene Wert des Materialaufmaßes nur für die Steuerung der Zustellung bei der folgenden Werkstückumdrehung verwendet werden. Da die Werkstückausbiegung im Verlauf der folgenden Werkstückumdrehung bei verringertem Materialaufmaß aber mit der Werkstückausbiegung während der vorangegangenen Werkstückumdrehung in der Regel nicht übereinstimmt, wird die für die folgende Werkstückumdrehung erwartete Werkstückausbiegung gemäß der Erfindung vorauss kalkuliert. Dazu wird ausgehend von der im Verlauf einer aktuellen Werkstückumdrehung bestimmten Werkstückausbiegung ein voraussichtlicher Wert der bei der nächsten Werkstückumdrehung erwarteten Werkstückausbiegung berechnet und es wird im Verlauf der folgenden Werkstückumdrehung ein Zustellschritt unter Vorgabe eines zur Kompensation des Einflusses der erwarteten Werkstückausbiegung in Abhängigkeit von dem vorauss kalkulierten Wert korrigierten Zustellbetrages ausgeführt. Der Wert der bei der nächsten Werkstückumdrehung erwarteten Werkstückausbiegung kann gemäß der Erfindung unter Berücksichtigung der Drehgeschwindigkeit des Werkstückes berechnet werden.

In Fortführung der Erfindung kann es zweckmäßig sein, die erste Messung des Materialaufmaßes frühestens im Verlauf der zweiten Werkstückumdrehung auszuführen. So kann zu Beginn die Schleifbearbeitung des Werkstückes ohne die erfindungsgemäß vorgeschlagene aufmaßabhängige Steuerung der Zustellung erfolgen und erst zum Ende hin mit der aufmaßabhängigen Zustellsteuerung gearbeitet werden. Dieses Vorgehen bietet sich insbesondere bei großen abzutragenden Materialaufmaßen an. Um das Verfahren gemäß der Erfindung besonders produktiv zu gestalten, ist in Ausgestaltung der Erfindung vorgesehen, daß das Materialaufmaß eines Werkstückes ausgehend von seinem Rohaufmaß bis zum Erreichen seines Fertigmaßes in einer bestimmten, fest vorgegebenen Anzahl von Werkstückumdrehungen mit je einem Zustellschritt abgenommen wird.

Der Vorteil der Erfindung besteht insbesondere darin, daß ein gewünschter, programmierter Verlauf der Zerspanleistung oder der Spanungsdicke während des Schleifprozesses auch bei einer Ausbiegung des Werkstückes sehr genau eingehalten wird. Außerdem wird mit diesem Verfahren der geforderte Fertigdurchmesser des Werkstückes mit wenigen Werkstückumdrehungen zuverlässig und genau erreicht. Das wirkt sich besonders vorteilhaft bei Werkstücken aus, die während ihrer Bearbeitung nur relativ langsam rotieren können, weil für ihre Bearbeitung mehrere Achsbewegungen der Maschine überlagert und miteinander koordiniert werden müssen. Solche Werkstücke, bei denen jede zusätzliche Umdrehung einen merkbaren zusätzlichen Zeitaufwand bedeutet, sind insbesondere exzentrisch umlaufende Hublager von Kurbelwellen oder unrunde Werkstücke wie Nockenwellen oder Polygone. Bei deren Bearbeitung führt das erfindungsgemäß vorgeschlagene Verfahren zu deutlich erhöhter Produktivität.

Die Erfindung wird nun anhand der Zeichnung näher erläutert.

Es zeigen

Fig. 1 eine schematische Seitenansicht einer Kurbelwellenschleifmaschine für die Ausführung des Verfahrens nach der Erfindung.

Fig. 2 eine vergrößerte Darstellung des Arbeitsbereichs der Maschine mit Werkstück, Schleifscheibe und Durchmessermeßgerät,

Fig. 3 eine grafische Darstellung des Verfahrens nach der Erfindung und
Fig. 4 bis 7 den Fortgang des Schleifverfahrens in verschiedenen Winkelpositionen einer Werkstückumdrehung.

Fig. 1 zeigt als Beispiel einer Maschine zum Ausführen des Verfahrens nach der Erfindung eine Kurbelwellenschleifmaschine. Wie auf dieser kann das Verfahren allerdings auch auf Rund- und Unrundschleifmaschinen, wie beispielsweise Nockenwellenschleifmaschinen eingesetzt werden.

Die in Fig. 1 dargestellte Schleifmaschine weist ein Maschinenbett 1 auf, auf welchem ein Schleif- oder Zustellschlitten 2 mit einer Schleifscheibe 3 horizontal in x-Richtung, der sogenannten x-Achse, verfahrbar geführt ist. Die Bewegung des Schleifschlittens 2 wird über nicht gezeigte Antriebsmittel, wie beispielsweise eine Kugelgewindespindel, durch einen Motor 4 angetrieben.

Auf dem Maschinenbett sind außerdem ein Werkstückspindelstock 6 und diesem außerhalb der Zeichenebene gegenüber ein nicht dargestellter Reitstock zum Einspannen eines Werkstückes in Form einer Kurbelwelle 7 angeordnet. Die Kurbelwelle ist zwischen dem Werkstückspindelstock 6 und dem Reitstock um die quer, vorzugsweise senkrecht zur x-Achse verlaufende Achse ihrer Lagersitze 8, die auch als C-Achse der Maschine bezeichnet wird, drehbar eingespannt. Bei der Rotation der Kurbelwelle 7 laufen ihre Kurbelzapfen 9, von denen in der Fig. 1 nur einer zu sehen ist, auf einer Kreisbahn um die Achse der Lagersitze 8 um. Der Antrieb des Werkstückspindelstocks 6 zum Drehen der Kurbelwelle 7 ist mit 11 bezeichnet. Der Werkstückspindelstock 6 und der Reitstock sind synchron parallel zur Kurbelwellenachse in Z-Richtung verfahrbar, um die Kurbelwelle in Längsrichtung bearbeitungsgerecht vor der Schleifscheibe 3 positionieren zu können. Auf der Maschine werden die exzentrisch umlaufenden Kurbelzapfen 9 und die konzentrisch rotierenden Lagersitze 8 bearbeitet.

Eine Maschinensteuerung 12 steuert die Antriebe der x-Achse und der C-Achse sowie einen nicht dargestellten Antrieb der Z-Achse.

Mittels einer Halterung 13 ist am Maschinenbett 1 eine Meßeinrichtung 14 zum Erfassen des Werkstückdurchmessers während seiner Bearbeitung angebracht. Diese Meßeinrichtung weist einen Durchmessermeßkopf 16 mit zwei den Werkstückdurchmesser abgreifenden Meßtastern 17 und 18 auf. Der Meßkopf ist an die Maschinensteuerung 12 angeschlossen. Ein an dem Meßkopf 16 vorgesehener Führungskörper 19 liegt mit einem Führungsprisma am Umfang des Werkstücks an und sorgt für dessen definierte Lage zwischen den Meßtastern 17 und 18. Der Meßkopf 16 mit dem Führungskörper 19 ist an einer Kolbenstange 21 befestigt, die in einem an der Halterung 13 um eine Achse 22 schwenkbaren Zylinder 23 geführt ist. Im Zylinder 23 ist ein nicht dargestelltes Kraftorgan untergebracht, das den Führungskörper 19 über die Führungsstange 21 fest gegen die Umfangsfläche des Werkstücks 9 drückt. Auf diese Weise behält der Meßkopf 16 während des ganzen Umlaufes des Werkstücks 9 um die Rotationsachse der Kurbelwelle Kontakt zum Werkstück. Einzelheiten dieser Meßeinrichtung, die die Inprozess-Messung des Werkstückdurchmessers oder seines Aufmaßes während der Bearbeitung erlaubt, sind der DE 35 21 710 C2 und der entsprechenden US 4 637 144 zu entnehmen, so daß weitere Erläuterungen der Meßeinrichtung hier nicht erforderlich sind.

Fig. 2 zeigt in schematischer vergrößerter Darstellung einen Ausschnitt aus der Fig. 1, wobei allerdings der Einfachheit halber ein konzentrisch umlaufender Lagersitz 8 der Kurbelwelle 7 als Werkstück zu bearbeiten ist. Außerdem sind ein Abschnitt der Schleifscheibe 3 und der Meßkopf 16 mit den Meßtastern 17 und 18 zu sehen. Der in Fig. 1 gezeigte Führungskörper 19 ist in Fig. 2 weggelassen und die Darstellung der Meßtaster ist aus Platzgründen verkürzt. Dargestellt sind in Fig. 2 außerdem der Durchmesser D_0 des Werkstückrohlings, der Durchmesser D_3 , das sogenannte Fertigmaß des fertig bearbeiteten Werkstücks und Durchmesser D_1 und D_2 , die sich im Laufe der Bearbeitung durch Materialabtrag nacheinander ergeben. Jeder Durchmesser D umfaßt als konstanten Wert den zu erzeugenden Solldurchmesser D_3 , das sogenannte Fertigmaß, und ein aktuelles Materialaufmaß A , das je nach dem Fortgang der Bearbeitung variiert. Eingetragen ist in Fig. 2 das auf den Werkstückradius bezogene Aufmaß A , um die Übersichtlichkeit der Darstellung nicht zu beeinträchtigen. Auf den Durchmesser bezogen beträgt das Aufmaß demnach $2A$. Der Durchmesser D_0 enthält noch das komplette Rohaufmaß $2A_0$, beim Solldurchmesser D_3 ist das Aufmaß A idealerweise 0. Auch die anderen in Fig. 2 dargestellten Größen t_i sind jeweils auf den Werkstückradius bezogen.

Der Meßkopf 16, der mit seinen Tastern 17 und 18 den Werkstückdurchmesser D abgreift, kann so vorbereitet sein, daß er an die Maschinensteuerung für die Weiterverarbeitung einen den Durchmesser repräsentierenden Wert abgibt. Heute ist es vielfach üblich, im Meßkopf den Sollwert D_3 des Durchmessers vom gemessenen Durchmesserwert D zu subtrahieren, so daß an die Maschinensteuerung unmittelbar ein das Materialaufmaß A darstellender Wert übergeben wird. Bei den folgenden Verfahrensbeschreibungen wird ein solcher Meßkopf vorausgesetzt und stets mit Aufmaßwerten A gerechnet.

Der Punkt A_x stellt die Eingriffslinie der Schleifscheibe am Werkstückumfang dar. Der Wert von A_x gibt die Lage der Schleifscheibe oder, was gleichbedeutend ist, die Lage des Schleifschlittens 2 auf der x-Achse an. Die Nullposition $A_x = 0$ der Schleifscheibe ist durch den Solldurchmesser D_3 des fertig bearbeiteten Werkstücks definiert. Das heißt, daß die Position, die die Schleifscheibe auf der x-Achse hat, wenn der Meßkopf 16 das Erreichen des Fertigmaßes D_3 feststellt, als Nullposition $A_x = 0$ für die Bearbeitung des nächsten Werkstücks festgesetzt wird.

Das Verfahren nach der Erfindung wird der Einfachheit halber am Beispiel der Bearbeitung eines um seine Längsachse 24 rotierenden zylindrischen Werkstücks 8 beschrieben, wie das in Fig. 2 gezeigt ist. Bei dem Werkstück 8 kann es sich um einen Lagerzapfen 8 einer Kurbelwelle 7 oder ein anderes rund zu schleifendes Werkstück handeln. Die Bearbeitung der Kurbelzapfen 9 der Kurbelwelle 7 erfolgt ganz entsprechend, wobei lediglich der Umlauf der Zapfen auf ihrer Kreisbahn um die Drehachse 24 und die sich dabei ständig ändernde Winkelbeziehung der Achsen zueinander beachtet werden müssen. Die rotierende Schleifscheibe 3 liegt an der zu schleifenden Umfangsfläche des Lagerzapfens 8 an (s. Fig. 2). Die Rotationsbewegung des Werkstücks 8 und die Linearbewegung des Schleifschlittens 2 werden von der CNC-Maschinensteuerung gesteuert und aufeinander

der abgestimmt. Währenddessen greifen die Taster 17 und 18 des Durchmessermeßkopfs 16 dauernd den aktuellen Durchmesser D oder das aktuelle Aufmaß Ai des Werkstücks ab.

Bei dem Verfahren nach der Erfindung ist die Zustellung der Schleifscheibe an die Werkstückumdrehung gebunden. Das bedeutet, daß im Verlaufe jeder Werkstückumdrehung ein Zustellschritt bestimmter Schrittweite ausgeführt wird. Dabei wird die Schleifscheibe 3 jeweils um einen bestimmten Zustellbetrag a zum Werkstück hin in eine vorgegebene Schleifscheibenposition Ax zugestellt. Die Größe des Zustellbetrages a eines Zustellschrittes ist jeweils abhängig von dem Istwert Ai des Aufmaßes, der vor Beginn der betreffenden Zustellung vorzugsweise am Ende der vorangehenden Werkstückumdrehung gemessen wird. Dieser Istwert wird im folgenden auch als aktuelles Aufmaß Ai bezeichnet. Die Abhängigkeit des Zustellbetrages a von dem Aufmaß Ai wird durch einen Algorithmus vorgegeben, der in der Maschinensteuerung hinterlegt wird. Er ist in einer Zuordnungstabelle enthalten, wie sie beispielsweise als Tabelle 1 für ein spezielles Werkstück gezeigt ist. Die darin angegebenen Zuordnungen von Zustellbeträgen a zu gemessenen Aufmaßwerten Ai sind empirisch oder aufgrund technologischer Bedingungen des zu bearbeitenden Werkstücks ermittelt und vorgegeben und variieren bei unterschiedlichen Werkstücken.

Tabelle 1

Aktuelles Aufmaß Ai [mm]	Zustellbetrag a [mm]
Ai > 0,5	0,25
0,5 > Ai ≥ 0,3	0,15
0,3 > Ai ≥ 0,2	0,08
0,2 > Ai ≥ 0,1	0,04
0,1 > Ai ≥ 0,05	0,03
0,04 > Ai ≥ 0,002	0,8* Ai

Solange im in der Tabelle 1 angegebenen Zahlenbeispiel das aktuelle Materialaufmaß Ai des Werkstücks noch größer ist als 0,5 mm, wird die Schleifscheibe 3 im Verlauf jeder Werkstückumdrehung um einen Betrag a von 0,25 mm zugestellt. Diese Zustellung erfolgt immer in einem relativ kleinen Winkelabschnitt w am Anfang der entsprechenden Werkstückumdrehung, wobei, wie das in Fig. 2 erkennbar ist, der Eingriffspunkt Ax der Schleifscheibe am Werkstück von dem Durchmesser D₀ zum Durchmesser D₁ wandert. Die neue Lage des Schleifscheibenumfangs nach der Zustellung ist gestrichelt angedeutet und mit 3.1, die neue Lage des Eingriffspunktes mit Axi bezeichnet. Die folgenden Zustellschritte verlaufen entsprechend. Der Winkelabschnitt w beträgt vorzugsweise etwa 10° bis 15°, so daß 345° bis 350° der Umdrehung zustellungsfrei sind. Wenigstens einmal während einer laufenden Werkstückumdrehung wird mit den ans Werkstück angelegten Meßtastern 17 und 18 des Meßkopfs 16 das aktuelle Materialaufmaß Ai bestimmt, wie das später anhand der Fig. 4 bis 7 beschrieben wird. Das geschieht vorzugsweise im letzten Viertel der jeweiligen Werkstückumdrehung, wenn die Taster tatsächlich nur das aktuelle Aufmaß nach der in dieser Umdrehung bereits erfolgten Zustellung erfassen, das für die Ermittlung des Zustellbetrages des Zustellschrittes der folgenden Werkstückumdrehung maßgeblich ist. Wird durch die Messung mit dem Meßkopf 16 nun beispielsweise festgestellt, daß das aktuelle Materialaufmaß Ai zwischen 0,2 und 0,1 mm liegt, wird der Zustellung der Schleifscheibe 3 entsprechend dem in Gestalt der Tabelle 1 in der Maschinensteuerung 12 hinterlegten Algorithmus während der folgenden Werkstückumdrehung ein Zustellbetrag a von nur noch 0,04 mm vorgegeben. So gibt die Maschinensteuerung 12 der während jeder Werkstückumdrehung fälligen Zustellung der Schleifscheibe 3 gerade den Zustellbetrag a vor, der sich aufgrund des in der Zuordnungstabelle gespeicherten Algorithmus aus dem in der vorangegangenen Werkstückumdrehung ermittelten Materialaufmaß ergibt. Nähert sich das Materialaufmaß schließlich unterhalb eines Grenzwertes dem Fertigmaß des Werkstücks, so werden die Zustellungen in den folgenden Werkstückumdrehungen nur noch in Bruchteilen des zuvor bestimmten aktuellen Aufmaßes Ai ausgeführt. Das geschieht bei dem in der Tabelle 1 angegebenen Bearbeitungsbeispiel dann, wenn das aktuelle Aufmaß kleiner als 0,04 mm wird. Dadurch, daß als Zustellbetrag a jetzt kein fester Wert mehr vorgegeben, sondern nur noch ein Bruchteil des aktuellen Aufmaßes angesetzt wird, wird die Gefahr, das vorgesehene Fertigmaß durch Materialabtrag zu unterschreiten, beträchtlich reduziert, wenn nicht sogar ausgeschlossen. Die Werte des gemessenen aktuellen Aufmaßes nähern sich vielmehr von Werkstückumdrehung zu Werkstückumdrehung immer mehr dem Fertigmaß an.

Da die Zustellung bei diesem Schleifverfahren an die Werkstückumdrehung gebunden ist und in Abhängigkeit vom jeweils aktuellen Materialaufmaß ausgeführt wird, bietet dieses Verfahren eine einfache und zuverlässige Möglichkeit, ein Werkstück mit wenigen Umdrehungen sehr genau auf sein Fertigmaß zu schleifen. Hohe Präzision und Produktivität zeichnen das beschriebene Verfahren also aus.

Zur Beschreibung einer zweiten Ausführungsform des Verfahrens nach der Erfindung wird auf die Fig. 3 und die Tabelle 2 Bezug genommen. Das Verfahren sieht auch in dieser Ausführungsform die Bindung der Zustellung an die Werkstückumdrehung vor, so daß im Verlauf jeder Werkstückumdrehung gerade ein diskreter Zustellschritt ausgeführt wird. Der Winkelabschnitt der Werkstückumdrehung, in welchem die für diese Umdrehung vorgesehene Zustellung stattfindet, kann die volle Werkstückumdrehung umfassen, also bis 360° frei gewählt werden. Vorzugsweise wird die gesamte Zustellung eines Schrittes aber in einem möglichst kleinen Winkelabschnitt w von 15° bis 20° vorgenommen, so daß während des Restes der Umdrehung kein weiterer Vorschub der Schleifscheibe 3 mehr erfolgt, wie das im Zusammenhang mit dem ersten Ausführungsbeispiel der Erfindung bereits erläutert wurde.

In den Fig. 4 bis 7 sind das Schleifen des Werkstücks während einer kompletten Werkstückumdrehung und

das Messen des aktuellen Aufmaßes dargestellt. Die Bezugszeichen stimmen mit denen der Fig. 2 überein. Fig. 4 zeigt die Position von Schleifscheibe und Werkstück unmittelbar nach einem Zustellschritt um den Betrag a . Das Werkstück hat sich dabei gerade um den Winkelabschnitt w in Pfeilrichtung gedreht. Die existierende Kontur des Werkstücks ist in den Fig. 4 bis 7 mit einer ausgezogenen Linie dargestellt. Die aufgrund der Zustellung entstehende Zwischenkontur repräsentiert eine strichpunktierte Linie. Die ursprüngliche Kontur stellt eine gestrichelte Linie dar. In Fig. 4 hat die Schleifscheibe durch den Zustellschritt um den Betrag a die in dieser Umdrehung zu erzeugende Zwischenkontur des Werkstücks mit dem Durchmesser D_1 erreicht. Die weitere Werkstückumdrehung verläuft nun zustellungsfrei, so daß rings am Umfang des Werkstücks Material mit einer vom Zustellbetrag a abhängigen Spannungsdicke abgetragen wird. In Fig. 5 ist das Werkstück um $90^\circ + w$ gedreht, so daß der Taster 18 des Meßkopfes 16 hier schon die neue Werkstückkontur des Durchmessers D_1 abgreift, während der andere Taster 17 noch am früheren Durchmesser D_0 anliegt. In Fig. 6 beträgt der Rotationswinkel bereits $270^\circ + w$. Nun liegt auch der zweite Taster 17 des Meßkopfes 16 an der gerade erzeugten Kontur an. Während der jetzt folgenden knappen Vierteldrehung erfassen die Taster 17 und 18 des Meßkopfes 16 korrekt den mit der gerade erfolgten Zustellung erzeugten Durchmesser D_1 und, was gleichbedeutend ist, das aktuelle Materialaufmaß A_{i1} . Fig. 7 zeigt die Position nach kompletter Vollendung der Werkstückumdrehung, in der ein neuer Zustellschritt beginnt.

Die zweite Ausführungsform des Verfahrens nach der Erfindung sieht vor, daß unter Berücksichtigung der technologischen Bedingungen und Voraussetzungen, die das zu bearbeitende Werkstück und die Maschine bieten, eine Folge von Soll-Spannungsdicken ts_i (mit $i = 1$ bis n) vorgegeben wird, die in einer entsprechenden Anzahl n von Werkstückumdrehungen U vom Werkstück abzutragen sind. In der ersten Spalte der Tabelle 2 sind acht Werkstückumdrehungen U ($i = 1$ bis 8) und in der vierten Spalte die den Umdrehungen zugewiesenen Sollwerte ts der Spannungsdicke angegeben. ts ist dabei der auf den Werkstückradius bezogene Wert der Spannungsdicke, d. h., der in der Tabelle angegebene Wert ts ist der halbe Wert der vom Durchmesser des Werkstücks in einer Umdrehung abzutragenden Materialdicke $2ts$. Die Spannungsdicken ts_i sind so vorgegeben, daß der Abtrag des gesamten Aufmaßes vom Werkstück mit möglichst hoher Genauigkeit und in möglichst wenigen Werkstückumdrehungen erfolgt. In Fig. 2 sind Sollspannungsdicken ts_1 , ts_2 und ts_3 eingezeichnet, die jede in einer Werkstückumdrehung vom Werkstück abgetragen werden sollen, wodurch sich nacheinander die eingezeichneten Zwischenkonturen mit den Soll- oder Ziel-Aufmaßwerten Ap_1 und Ap_2 und das Fertigmaß D_3 ergeben. Die Aufmaßwerte Ap_i sind in Spalte 2 der Tabelle 2 angegeben. Diese Aufmaßwerte sind wieder auf den Werkstückradius bezogen. Auf den Durchmesser des Werkstücks bezogen betragen die vorgegebenen Aufmaßwerte $2Ap_i$. In Fig. 2 sind diese auf den Radius bezogenen Aufmaßwerte und Spannungsdicken eingezeichnet. Die Größenverhältnisse sind in der Zeichnung stark übertrieben dargestellt, tatsächlich betragen die Spannungsdicken ts Bruchteile von Millimetern, wie das die Tabellen 1 und 2 an Zahlenbeispielen zeigen. Jeder Spannungsdicke ts entspricht ein Zustellschritt der Schleifscheibe während der betreffenden Werkstückumdrehung i in eine Schleifscheibenposition Ax_i . Die Schrittweite oder die Vorschubwerte der Schleifscheibe aus einer Position Ax_{i-1} in die nächste Ax_i wird als Zustellbetrag a bezeichnet. In Fig. 2 sind ausgehend von der Rohkontur D_0 des Werkstücks drei Spannungsdicken und entsprechend drei in drei Werkstückumdrehungen auszuführende Zustellschritte angenommen. In der Realität ist mit mehr Umdrehungen zu rechnen, wie das auch die Tabelle 2 und die Fig. 3 zeigen.

Wären die Maschine und das Werkstück absolut steif, dann wären die Zustellbeträge a_i gleich den Spannungsdicken ts_i und durch Zustellen der Schleifscheibe um diese Beträge a_i würden die in den Spalten 4 und 2 vorgegebenen Werte der Spannungsdicken ts_i und Aufmaße Ap_i genau eingehalten und erreicht werden können. Tatsächlich weicht aber zumindest das Werkstück unter dem Druck der Schleifscheibe 3 aus, so daß die tatsächlich abgetragene Spannungsdicke t um die Ausbiegung Bi kleiner ist als die gewünschte Spannungsdicke ts und auch das gewünschte Aufmaß Ap um den Betrag Bi der Werkstückausbiegung verfehlt wird. Das ist im Diagramm der Fig. 3 in Bezug auf die zweite Werkstückumdrehung dargestellt. Man sieht, daß das aktuelle Materialaufmaß A_{i2} deutlich hinter dem vorgegebenen Aufmaßwert Ap_2 zurückbleibt, wenn die Schleifscheibe um den der vorgegebenen Spannungsdicke ts_2 gleichen Zustellbetrag a_2 zugestellt wird. Die Differenz ist die Werkstückausbiegung Bi_2 . Es ist also eine der Werkstückausbiegung entsprechende Korrektur der Zustellbeträge a_i erforderlich, um jeweils zu den den Werkstückumdrehungen zugewiesenen Spannungsdicken ts_i und Aufmaßwerten Ap_i zu kommen. Um die notwendigen Korrekturwerte Bk_i für die Kompensation der bei der folgenden Umdrehung erwarteten Werkstückausbiegung zu erhalten, wird zunächst die aktuelle Ausbiegung Bi_{i-1} der Werkstücke während einer laufenden Umdrehung ($i-1$) ermittelt. Dazu wird das mit Hilfe des Meßkopfes 16 im letzten Viertel der vorangehenden Umdrehung erfaßte aktuelle Aufmaß A_{i-1} mit der aktuellen Position Ax_{i-1} der Schleifscheibe 3 verglichen. Nach der Formel

$$Bi = Ai - Ax \quad (1)$$

ergibt sich daraus die aktuelle Ausbiegung Bi des Werkstücks. Die aktuellen Aufmaßwerte Ai , die sich auf diese Weise nacheinander bei der Werkstückbearbeitung ergeben, sind in der dritten Spalte der Tabelle 2 aufgeführt. Die entsprechenden Werte der aktuellen Ausbiegung Bi befinden sich in der sechsten Spalte der Tabelle 2. In Fig. 3 sind die im Verlauf der Werkstückumdrehungen U gemessenen aktuellen Aufmaßwerte Ai_i (Istwerte) als strichpunktierte horizontale Linien eingezeichnet. Die Istwerte Bi_i der Ausbiegung erscheinen als entsprechend bezeichnete Doppelpfeile zwischen Ai_i und Ap_i .

Aus der aktuellen Ausbiegung Bi ergibt sich mit Hilfe der Gleichung

$$Bk = (ts_i/ts_{i-1})^{0,8}(Bi_{i-1} - 0,005) + 0,005 \quad (2)$$

der für die Zustellung während der folgenden Werkstückumdrehung erwartete Wert B_k der Werkstückausbiegung. Darin sind t_{s_i} und $t_{s_{i-1}}$ die gewünschten Spannungsdicken der folgenden und der gerade vollendeten Werkstückumdrehung und B_{i-1} die am Ende der vergangenen Werkstückumdrehung erfaßte Werkstückausbiegung. Die sich während der Werkstückbearbeitung aufgrund Aufmaßmessung und der Berechnungen nacheinander ergebenden Korrekturwerte B_k enthält für ein Bearbeitungsbeispiel die fünfte Spalte der Tabelle 2. Die Gleichung (2) ist empirisch gewonnen. Sie bietet eine gute Vorausbestimmung der Werkstückausbiegung. Es sind jedoch auch andere formelmäßige Beziehungen für die Bestimmung der erwarteten Werkstückausbiegung B_k möglich.

Der Wert der erwarteten Werkstückausbiegung B_k wird als Korrekturwert für die Bestimmung der Schleifscheibenposition A_{x_i} in der nächsten Werkstückumdrehung i , oder was gleichbedeutend ist, des Zustellbetrages a benutzt. Die aufeinanderfolgenden, zum Teil mit B_k korrigierten Schleifscheibenpositionen A_{x_i} sind in Spalte 7 der Tabelle 2 aufgeführt. In Fig. 3 sind sie mit ausgezogenen Linien dargestellt. Die als Korrekturgrößen B_k vorausgerechneten Werkstückausbiegungen erscheinen in Fig. 3 als Doppelpfeile mit entsprechender Bezeichnung.

Die Schleifscheibenpositionen A_{x_i} für die Werkstückumdrehungen i ergeben sich aus

$$A_{x_i} = A_{p_i} - B_{k_i} \quad (3)$$

worin A_{p_i} das während der Umdrehung i zu erreichende Sollaufmaß ist. In der auf diese Weise korrigierten Schleifscheibenposition A_{x_i} ist die während der Umdrehung i erwartete Werkstückausbiegung B_k berücksichtigt, so daß im Laufe der aktuellen Werkstückumdrehung wenigstens angenähert die gewünschte Spannungsdicke t_{s_i} vom Werkstück abgetragen und das für die Umdrehung vorgesehene Sollaufmaß als Aufmaßziel A_{p_i} weitgehend exakt erreicht wird.

Tabelle 2

U [i= 1 bis n]	A_p [mm]	A_i [mm]	t_s [mm]	B_k [mm]	B_i [mm]	A_x [mm]
1	0,69	-	0,26	-	-	A_p
2	0,47	0,54	0,22	-	0,070	A_p
3	0,29	0,305	0,18	0,060	0,075	0,230
4	0,14	0,144	0,15	0,066	0,070	0,074
5	0,02	0,021	0,12	0,059	0,060	- 0,039
6	0,01	0,009	0,01	0,012	0,011	- 0,002
7	0,003	0,002	0,007	0,010	0,009	- 0,007
8	0	- 0,001	0,003	0,007	0,006	- 0,007

Tabelle 2 zeigt ein Zahlenbeispiel, in dem das Abschleifen eines Rohaufmaßes des Werkstückes von ungefähr 0,95 mm in acht Werkstückumdrehungen auf das Sollmaß des Werkstückes mit dem Aufmaß 0 erfolgt. In Fig. 3 ist das Verfahren in einem Diagramm graphisch dargestellt, in welchem das Aufmaß oder die x-Position der Schleifscheibe gegen die Werkstückumdrehung aufgetragen ist.

Im folgenden Zahlenbeispiel sind alle Werte und Berechnungen auf den Werkstückradius bezogen. Den in der Tabelle 2 angegebenen Umdrehungen 1 bis 8 sind feste Werte von Soll-Spannungsdicken t_s und sich daraus ergebenden Soll-Aufmaßen A_p zugewiesen. Um diese Werte während des Schleifens eines Werkstückes mit einem Rohaufmaß von 0,95 mm zu realisieren, wird nun folgendermaßen vorgegangen. Die rotierende Schleifscheibe liegt im Punkt A_{x_0} am Umfang des Werkstückes 8 an, das beim Durchmesser D_0 noch das Rohaufmaß $A_0 = 0,95$ mm aufweist. Mit der ersten Umdrehung des Werkstückes soll nun entsprechend der Spalte 4 der Tabelle 2 eine Schichtdicke von $t_s = 0,26$ mm vom Werkstück abgetragen werden, so daß sich das Aufmaß auf $A_p = 0,69$ mm reduziert. Dazu wird, da aktuelle Meßwerte des Aufmaßes nicht vorliegen und die Durchbiegung des Werkstückes berücksichtigende Korrekturgrößen nicht ermittelt werden können, die Schleifscheibe entsprechend der Spalte 7 der Tabelle 2 in die Position $A_{x_1} = A_{p_1} = 0,69$ mm bewegt. Das bedeutet einen Zustellbetrag a_1 von 0,26 mm, der mit der für die erste Umdrehung vorgegebenen Spannungsdicke $t_s = 0,26$ mm übereinstimmt. Die Lage der Schleifscheibe am Ende der Zustellung der ersten Werkstückumdrehung ist in Fig. 2 unmaßstäblich mit der gestrichelten Linie 3.1 angedeutet. Abweichend hiervon ist es auch möglich, schon bei den ersten Umdrehungen des Werkstückes dessen Ausbiegung zu berücksichtigen. Das kann geschehen, indem man die Zustellbeträge mit Erfahrungswerten der Ausbiegung korrigiert. So kann man schon bei den ersten Zustellschritten die entstehenden Abweichungen vom gesetzten Aufmaßziel reduzieren.

Da am Ende der ersten Umdrehung des Werkstückes noch kein Meßwert des aktuellen Aufmaßes des Werkstückes vorliegt, wird die Zustellung der Schleifscheibe in der zweiten Werkstückumdrehung noch einmal auf den programmierten Aufmaßwert Ap_2 , der der zweiten Umdrehung zugewiesen ist, bezogen. Die Schleifscheibe wird also um den Zustellbetrag $a_2 = ts_2 = 0,22$ mm in die neue Position Ap_2 vorgeschoben. Gleichzeitig werden die Meßtaster 17 und 18 des Meßkopfes 16 an das Werkstück angelegt, so daß während dieser Umdrehung das aktuelle Aufmaß Ai_2 erfaßt wird, das beispielsweise 0,54 mm beträgt wie das in Spalte 3 der Tabelle 2 angegeben ist. Aufgrund dieses aktuellen Aufmaßwertes von 0,54 mm ergibt sich nach der oben angegebenen Formel (1) eine aktuelle Werkstückausbiegung Bi_2 von 0,07 mm, die in der Spalte 6 der Tabelle 2 eingetragen ist. In Fig. 3 sieht man, daß die in der zweiten Werkstückumdrehung vorgenommene Schleifscheibenzustellung nicht zu dem gewünschten Materialabtrag der Schichtdicke ts_2 geführt hat, sondern daß sie, wie die strichpunktierte Linie Ai_2 zeigt, um den Betrag Bi_2 der Werkstückausbiegung hinter ihm zurückgeblieben ist. Das in der zweiten Umdrehung gemessene aktuelle Materialaufmaß Ai_2 unterscheidet sich um diesen Betrag Bi_2 der Werkstückausbiegung von dem dieser Umdrehung zugewiesenen Aufmaßziel Ap_2 , das eigentlich hätte erreicht werden sollen.

Aus dem für die zweite Umdrehung erfaßten Wert Bi_2 der Werkstückausbiegung wird nun mit der Formel (2) ein Korrekturwert Bk_3 ermittelt, der eine in der dritten Werkstückumdrehung erwartete Werkstückausbiegung Bk_3 repräsentiert. Diese Ausbiegung beträgt, wie die fünfte Spalte der Tabelle 2 zeigt im angenommenen Zahlenbeispiel $Bk_3 = 0,06$ mm. Dieser Wert dient nun als Korrekturwert für die neue Schleifscheibenposition Ax_3 der Schleifscheibe bzw. für den Zustellbetrag a_3 . Aufgrund der Beziehung (3) ergibt sich als neue Schleifscheibenposition in der dritten Umdrehung der Wert $Ax_3 = 0,23$ mm. Dieser Wert ist in dem Diagramm der Fig. 3 eingezeichnet, ebenso wie der Korrekturwert Bk_3 und der der dritten Umdrehung zugewiesene Aufmaßwert Ap_3 . Die Schleifscheibe wird also in der dritten Werkstückumdrehung zur Kompensation der erwarteten Werkstückausbiegung um den Betrag Bk_3 weiter zugestellt, als der dieser Werkstückumdrehung zugewiesenen Soll-Spannungsdicke ts_3 und dem damit vorgegebenen Aufmaßziel Ap_3 entspricht. Während des Verlaufs der dritten Werkstückumdrehung wird wieder das aktuelle Materialaufmaß Ai_3 gemessen, das in Fig. 3 ebenfalls dargestellt ist. Es zeigt sich, daß die um die erwartete Ausbiegung Bk_3 des Werkstücks korrigierte Zustellung der Schleifscheibe um den Betrag a_3 dazu führt, daß sich der Abstand des aktuellen Aufmaßes Ai_3 vom vorgegebenen Aufmaß Ap_3 gegenüber der zweiten Umdrehung sehr stark verringert hat. Die weitere Fortführung des Verfahrens in diesem Sinne, wie sie sich aus der Tabelle 2 ergibt, zeigt in Fig. 3 deutlich, daß sich die tatsächlichen Aufmaßwerte Ai_j den programmierten Werten Ap_i immer mehr annähern, bis die Differenz in der letzten Umdrehung tolerierbar klein wird. Das vorgesehene Fertigmaß mit dem Aufmaß 0 wird somit in sehr wenigen Werkstückumdrehungen mit äußerst geringer Abweichung erreicht.

Damit stellt die Erfindung ein Schleifverfahren zur Verfügung, mit dem insbesondere langsam rotierende Werkstücke in wenigen Umdrehungen mit hoher Präzision und mit hoher Produktivität geschliffen werden können.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Umfangsschleifen rotierender Werkstücke, bei dem das Werkstück um eine erste Achse (C-Achse) gedreht wird, eine rotierende Schleifscheibe in materialabtragendem Kontakt mit dem Werkstück entlang einer in einem vorgegebenen Winkel quer zur ersten Achse verlaufenden zweiten Achse (x-Achse) mit einem Zustellschritt pro Werkstückumdrehung zur ersten Achse hin zugestellt wird und ein am Werkstückumfang vorhandenes Materialaufmaß bis zu einem vorgegebenen Fertigmaß abgetragen wird, dadurch gekennzeichnet, daß die Zustellung wenigstens einiger Zustellschritte in Abhängigkeit vom Materialaufmaß (Ai) gesteuert wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß im Verlauf wenigstens einer Werkstückumdrehung wenigstens einmal das aktuelle Werkstückaufmaß Ai erfaßt wird und daß die Zustellung der Schleifscheibe beim folgenden Zustellschritt in Abhängigkeit von dem aktuellen Werkstückaufmaß Ai gesteuert wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Zustellschritte jeweils in einem vorgegebenen Winkelabschnitt (w) am Beginn einer Werkstückumdrehung (i) ausgeführt werden und daß das Materialaufmaß Ai jeweils gegen Ende der Werkstückumdrehung (i), vorzugsweise innerhalb des letzten Viertels der Umdrehung, gemessen wird.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Zustellung durch Beeinflussung des Zustellbetrags (a_i) der Zustellschritte gesteuert wird.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß jedem Wert des Materialaufmaßes (Ai_i) in einer Zuordnungstabelle ein Zustellbetrag (a_i) zugeordnet wird, daß die Zuordnungstabelle in einer Maschinensteuerung gespeichert wird und daß die Zustellung der Schleifscheibe jeweils mit dem Zustellbetrag (a_i) ausgeführt wird, der in der Zuordnungstabelle dem Wert des aktuellen Materialaufmaßes (Ai_i) zugeordnet ist.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß in der Maschinensteuerung ein die Werte des Materialaufmaßes (Ai_i) mit bestimmten Zustellbeträgen (a_i) verknüpfender Algorithmus hinterlegt wird und daß die Zustellung jeweils mit dem Zustellbetrag (a_i) ausgeführt wird, der aufgrund des Algorithmus aus dem jeweils aktuellen Materialaufmaß (Ai_i) ermittelt wird.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß ein unterer Grenzwert des Materialaufmaßes (Ai) festgelegt wird und daß der Zustellung der Schleifscheibe im nächsten Zustellschritt ein fester Bruchteil des aktuellen Materialaufmaßes vorgegeben wird, sobald dieses den Grenzwert unterschreitet.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß einer Reihe von Werkstückumdrehungen (i) je ein Sollwert (ts_i) der Spanungsdicke zugewiesen wird und daß im Verlauf einer jeden Werkstückumdrehung (i) wenigstens angenähert Material der ihr zugewiesenen Spanungsdicke vom Werkstück abgetragen wird.
9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Schleifscheibe bei jeder Werkstückumdrehung (i) um einen von der Spanungsdicke (ts_i) und einer Korrekturgröße (Bk_i) abhängigen Zustellbetrag (a_i) zum Werkstück hin zugestellt wird. 5
10. Verfahren nach Anspruch 8 oder 9, dadurch gekennzeichnet, daß das Werkstück unter der Wirkung der Schleifscheibe beim Schleifen quer zu seiner Längsachse in x-Richtung ausgebogen wird und daß das Ausmaß der Ausbiegung (Bi_i) erfaßt und in der Korrekturgröße (Bk_i) zur Korrektur des Zustellbetrages (a_i) im Sinne der Kompensation des Einflusses der Durchbiegung verwertet wird. 10
11. Verfahren nach Anspruch 9 oder 10, dadurch gekennzeichnet, daß im Verlauf einer aktuellen Werkstückumdrehung (i) das Materialaufmaß (Ai_i) und die Position (Ax_i) des Zustellschlittens auf der x-Achse erfaßt werden und daß aus dem aktuellen Materialaufmaß (Ai_i) und der Schlittenposition (Ax_i) die aktuelle Ausbiegung (Bi_i) des Werkstückes bestimmt wird. 15
12. Verfahren nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß ausgehend von der im Verlauf einer Werkstückumdrehung ($i-1$) bestimmten Werkstückausbiegung (Bi_{i-1}) ein voraussichtlicher Wert (Bk_i) der bei der nächsten Werkstückumdrehung (i) erwarteten Werkstückausbiegung berechnet wird und daß im Verlauf dieser Werkstückumdrehung (i) ein Zustellschritt unter Vorgabe eines zur Kompensation des Einflusses der erwarteten Werkstückausbiegung in Abhängigkeit von dem vorauskalkulierten Wert (Bk_i) korrigierten Zustellbetrags (a_i) ausgeführt wird. 20
13. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß der Wert (Bk_i) der erwarteten Werkstückausbiegung unter Berücksichtigung der Drehgeschwindigkeit (n) des Werkstücks berechnet wird.
14. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 13, dadurch gekennzeichnet, daß die erste Messung des Materialaufmaßes Ai frühestens im Verlauf der zweiten Werkstückumdrehung ausgeführt wird. 25
15. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 14, dadurch gekennzeichnet, daß das Materialaufmaß eines Werkstücks ausgehend von seinem Rohaufmaß bis zum Erreichen seines Fertigmaßes in einer bestimmten fest vorgegebenen Anzahl (n) von Werkstückumdrehungen mit je einem Zustellschritt abgenommen wird.

Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen

30

35

40

45

50

55

60

65

Fig. 1

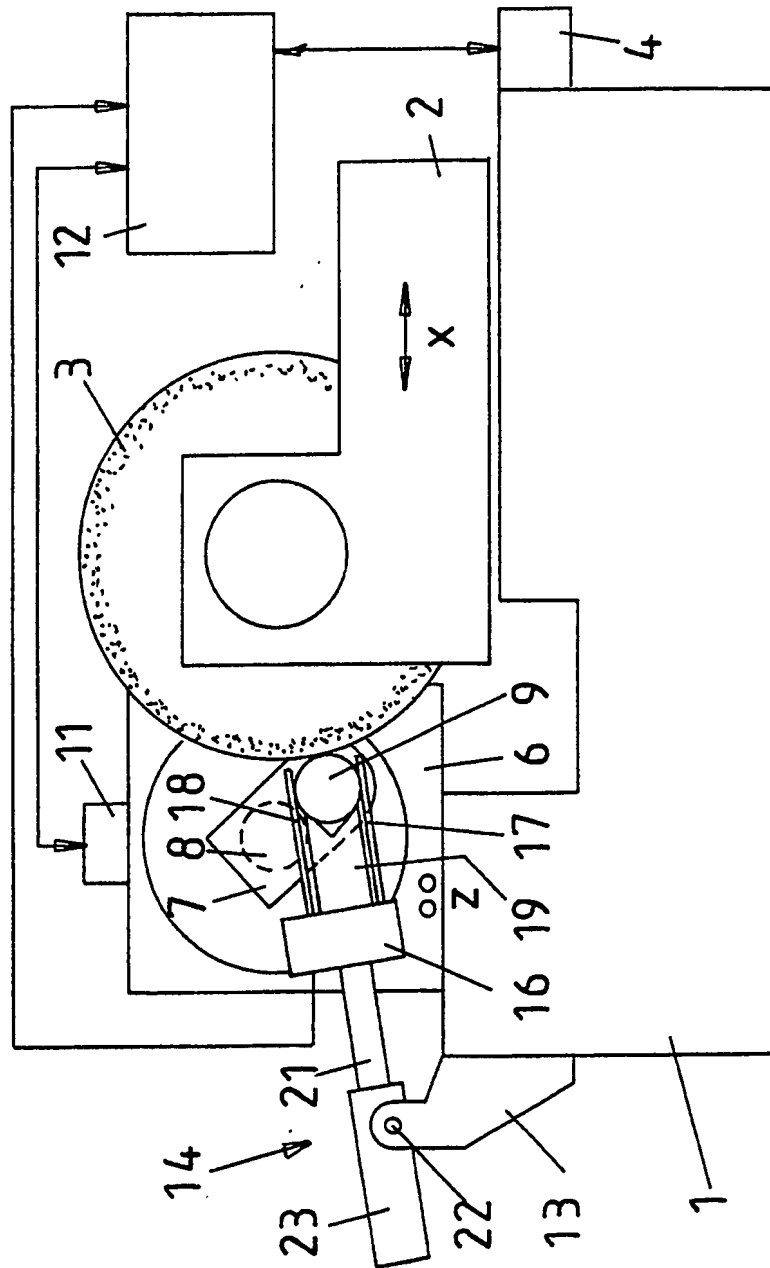
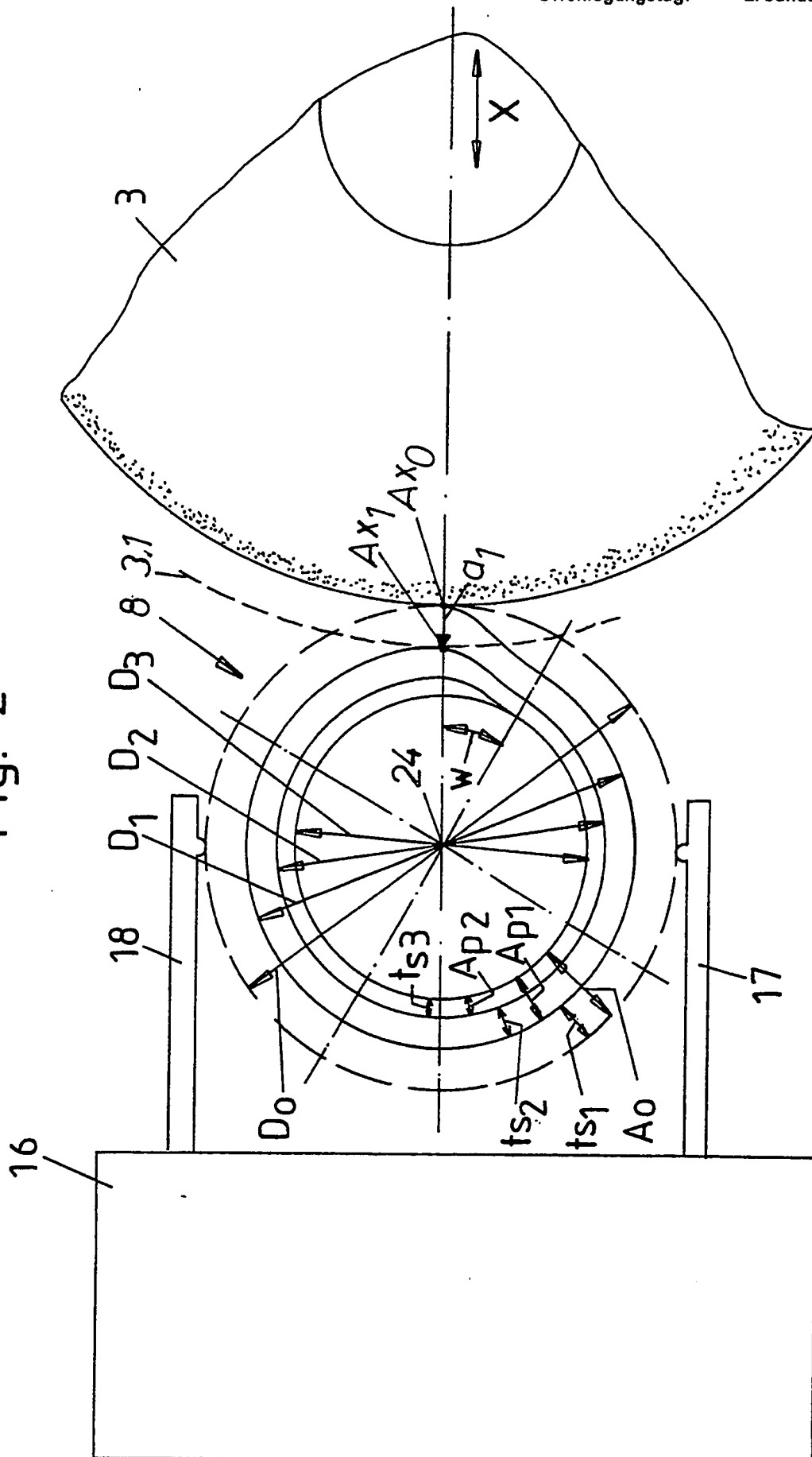


Fig. 2



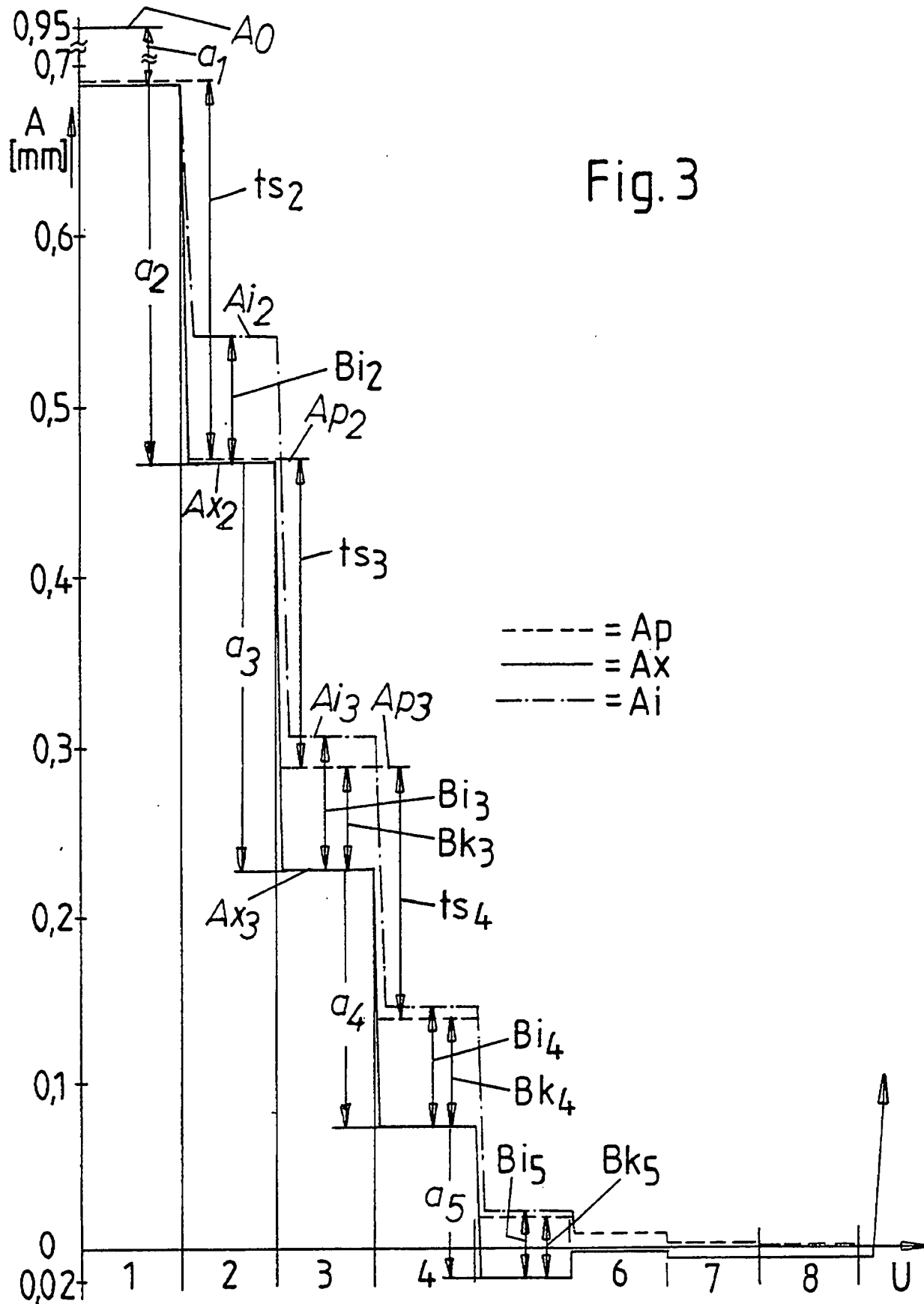


Fig. 4

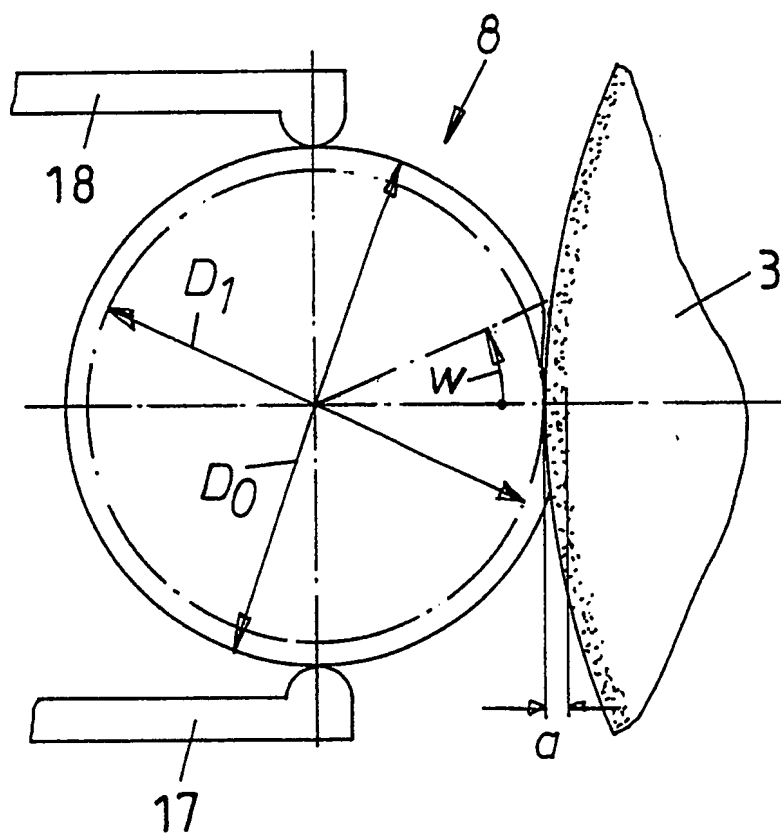


Fig. 5

